

УДК 621.391.26

В.Д. Карлов<sup>1</sup>, А.Н.Чёрный<sup>2</sup>, Д.В. Карлов<sup>1</sup>, О.В. Бесова<sup>1</sup><sup>1</sup> Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков<sup>2</sup> НИЦ (государственный океанариум) Вооруженных Сил Украины, Севастополь

## К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА ФАРАДЕЕВСКОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДВУХКАНАЛЬНЫМ ФАЗОИЗМЕРИТЕЛЕМ

В статье в рамках теории некогерентного рассеяния сигналов на ионосферной плазме получено выражение для оценки точности измерения угла  $\Phi$  фарадеевского вращения плоскости поляризации двухканальным фазоизмерителем синтезированным по критерию максимума логарифма отношения правдоподобия. Рассмотрена возможность использования полученного соотношения для дисперсии оценки  $\Phi$  применительно к случаю его измерения по разности фаз между обыкновенным и необыкновенным компонентами сигнала рассеянного на тепловых флуктуациях электронной концентрации ионосферы.

**Ключевые слова:** ионизированная среда, фазоизмеритель, эффект Фарадея.

### Введение

**Постановка проблемы.** В радиолокационной практике при локации космических целей с использованием РЛС дальнего обнаружения довольно часто приходится иметь дело с многоэлементной целью [1]. При этом в случае если необходимо измерить дальность одного из элементов лоцируемой многоэлементной цели, то фактически решается задача измерения дальности до полезной цели на фоне мешающих отражений. В работе [2] предложено для подавления мешающих отражений при локации полезной цели использовать эффект Фарадея. При этом в [2] показано, это подавление мешающих сигналов, а следовательно и точность измерения дальности полезного сигнала зависит от точности измерения угла поворота плоскости поляризации сигнала, обусловленного эффектом Фарадея, при его рассмотрении от радиолокатора до лоцируемой цели. В [3] предложено измерение угла фарадеевского вращения плоскости поляризации осуществлять как разность фаз  $\Delta\phi$  между обыкновенным и необыкновенным компонентами сигнала некогерентно рассеянного на ионосферной плазме. При этом в рамках теории некогерентного рассеяния радиоволн в [3] синтезирована схема измерителя  $\Delta\phi$ . Однако, при синтезе схемы фазоизмерителя  $\Delta\phi$  предполагалось, что набег фарадеевской разности фаз  $\Delta\phi$  в пределах рассеивающего (импульсного) объема достаточно мал, так что справедливым является соотношение:

$$\int_0^{2R_1} [n_1(r) - n_2(r)] dr \cong \int_0^{2R_0} [n_1(r) - n_2(r)] dr, \quad (1)$$

где  $n_1, n_2$  – показатель преломления ионизированной среды (ионосферы) для сигнала с правой и для сигнала с левой круговыми поляризациями (обыкновенный и необыкновенный компоненты) соответственно.

$R_0, R_1$  – дальность до центра и до 1-й части рассеивающего объема соответственно.

Однако как показывают результаты экспериментальных исследований [4] на практике соотношение (1) может не выполняться. Вместе с тем в известной литературе анализ работы измерителя фарадеевской разности фаз  $\Delta\phi$  синтезированного в [3] не проводился.

**Цель статьи:** В рамках теории некогерентного рассеяния радиоволн на ионосферной плазме получить соотношение для дисперсии  $D(\Delta\phi)$  оценки фарадеевской разности фаз ( $\Delta\phi$ ) измерителя [3] и проанализировать как влияет на  $D(\Delta\phi)$  нарушение условия (1).

### Основная часть

При проведении синтеза измерителя разности фаз  $\Delta\phi$  между обыкновенным и необыкновенным компонентами сигнала некогерентно рассеянного на ионосферной плазме в [3] полагалось, что на вход измерителя поступает сигналы  $x_{1,2}(t)$  представляющие собой смесь сигнала  $S_{1,2}(t)$  некогерентно рассеянного ионосферой и шума  $e_{1,2}(t)$ :

$$x_{1,2}(t) = S_{1,2}(t) + e_{1,2}(t). \quad (2)$$

Шумы  $e_{1,2}(t)$  в каналах полагались статистически независимыми, гауссовыми, со спектральной плотностью  $N_0$ . Сигналы  $S_{1,2}(t)$  представлялись в виде

$$S_{1,2}(t) = \sum_{e=1}^M S_{1,2e}(t),$$

где  $M$  – число рассеивателей в импульсном объеме,  $S_{1,2}(t)$  – эхо-сигналы от одиночного рассеивателя (флуктуационного скопления электронов) на выходе согласованного фильтра.

В рамках теории некогерентного рассеяния радиоволн по критерию максимума логарифма отношения правдоподобия в [3] синтезирован алгоритм оптимального измерения разности фаз  $\Delta\phi$  в виде:

$$\Delta\phi = \arctg \frac{\gamma_1}{\gamma_2}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \sum_{e=1}^K (x_{1e}^S \cdot x_{2e}^C - x_{1e}^C \cdot x_{2e}^S), \\ \gamma_2 &= \sum_{e=1}^K (x_{1e}^S \cdot x_{2e}^C + x_{1e}^C \cdot x_{2e}^S), \\ x_{1e}^C &= \int_{et_u}^{(e+1)t_u} x_1(\tau) \cos \omega_0 \tau d\tau, \\ x_{2e}^C &= \int_{et_u}^{(e+1)t_u} x_2(\tau) \cos \omega_0 \tau d\tau, \\ x_{1e}^S &= \int_{et_u}^{(e+1)t_u} x_1(\tau) \sin \omega_0 \tau d\tau, \\ x_{2e}^S &= \int_{et_u}^{(e+1)t_u} x_2(\tau) \sin \omega_0 \tau d\tau. \end{aligned}$$

Полученному алгоритму (3) соответствует схема двухканального фазоизмерителя, приведенная на рис. 1.

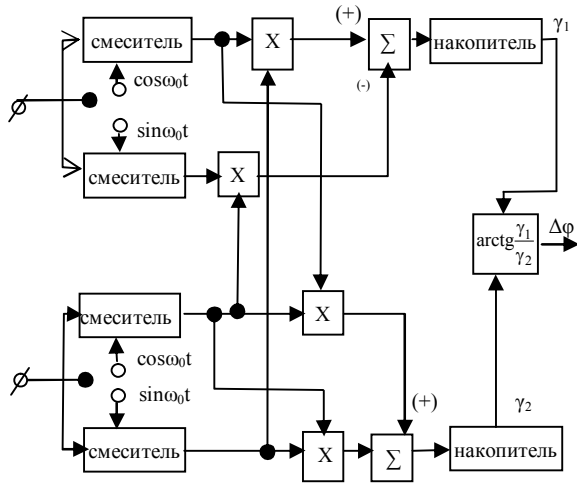


Рис. 1. Измеритель разности фаз между обычным и необычным компонентом некогерентно рассеянного ионосферой сигнала

Из (3), используя метод линеаризации [5] находим, что дисперсия оценки  $\Delta\phi$  определяется соотношением:

$$D\{\Delta\phi\} = \frac{\bar{\gamma}_2^2 D\{\gamma_1\} + \bar{\gamma}_1^2 \cdot D\{\gamma_2\} - 2\bar{\gamma}_1 \bar{\gamma}_2 \cdot K_\gamma}{[\bar{\gamma}_1^2 + \bar{\gamma}_2^2]^2}, \quad (4)$$

где  $\bar{\gamma}_{1,2}$  – математическое ожидание процессов на выходах 1-го и 2-го накопителей схемы рис. 1 соответственно,  $D\{\gamma_{1,2}\}$  – дисперсия процессов  $\bar{\gamma}_{1,2}(t)$ ,

$K_\gamma$  – коэффициент взаимной корреляции процессов  $\bar{\gamma}_1(t)$  и  $\bar{\gamma}_2(t)$ .

Рассмотрев прохождение смеси сигналов  $S_{1,2}(t)$  с шумом  $e_{1,2}(t)$  через элементы двухканального фазоизмерителя, и полагая среднюю концентрацию электронов  $N$  в пределах объема рассеяния постоянной, находим, что

$$\bar{\gamma}_{1,2} = m \cdot \rho \cdot P_s \frac{\sin \Delta\phi}{\cos \Delta\phi}, \quad (5)$$

$$D\{\gamma_{1,2}\} = m \left\{ P_1 \left[ 1 \pm \rho_2 \cos 2\Delta\phi \right] + \Delta_{1,2} + 0,5P_{ш} \times \right. \\ \left. \times P_s + \frac{1}{8} P_{ш}^2 - \rho_1^2 P_s^2 \frac{\sin^2 \Delta\phi}{\cos^2 \Delta\phi} \right\}, \quad (6)$$

$$K_\gamma = m \left\{ \sin 2\Delta\phi \left[ P_1 \cdot \rho - 0,5\rho_1^2 P_s^2 \right] + \Delta\gamma \right\}, \quad (7)$$

где  $P_s$  – мощность рассеянного сигнала на выходе согласованных фильтров приемника,  $\rho_1$  – коэффициент взаимной корреляции между обычным и необычным компонентами рассеянного сигнала,

$$P_s = \frac{A_1^2 N B_0}{R_0^2} \cdot \frac{c\lambda}{8\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\tau, \Omega)|^2 < |\delta N(\Omega)|^2 > d\tau d\Omega, \quad (8)$$

$$A_1 = \sqrt{\frac{P_0 G_{1n} G_{1np} \lambda^2 \sigma_e}{(4\pi)^3} \frac{C_1 T_{эф}}{2}},$$

$$B_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi g_n^2(\varphi, \theta) g_{np}^2(\varphi, \theta) d\varphi d\theta$$

$$\rho_1 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\tau, \Omega)|^2 < |\delta N(\Omega)|^2 > \cos \omega_\phi \tau d\tau d\Omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\tau, \Omega)|^2 < |\delta N(\Omega)|^2 > d\tau d\Omega}, \quad (9)$$

$$\omega_\phi = \omega_0(n_1 - n_2),$$

$$P_1 = \frac{A_1^2 N B_1 c \lambda}{256 \cdot R_0^6 \pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\tau, \Omega)|^4 < |\delta N(\Omega)|^2 > d\tau d\Omega, \quad (10)$$

$$\rho_2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\tau, \Omega)|^4 < |\delta N(\Omega)|^2 > \cos 2\omega_\phi \tau d\tau d\Omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\tau, \Omega)|^4 < |\delta N(\Omega)|^2 > d\tau d\Omega}, \quad (11)$$

$$B_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi g_n^4(\varphi, \theta) g_{np}^4(\varphi, \theta) d\varphi d\theta$$

$P_{ш}$  – мощность шумов на выходе согласованных фильтров приемника ( $P_{ш} = (c_1^2 N_0 / 4) \cdot T_{эф}$ ),  $N_0$  – спектральная плотность шума, поступающего на вход фильтров,  $\Delta_{1,2,\gamma}$  – добавки, которые, как показал анализ, малы по сравнению с другими слагаемыми (6) и (7) соответственно,  $m$  – число отсчетов смеси сигнала с шумом, участвующих в накоплении.

При накопленні в межах однієї реалізації  $m \approx T_{\text{эф}}/\tau_{\text{сн}}$ , где  $T_{\text{эф}}$  – довжина зондирующего імпульса,  $\tau_{\text{сн}}$  – інтервал кореляції прийнятого некогерентно розсіяного на іоносферній плазмі сигналу. При накопленні за «n» тактов зондування  $m = n \cdot T_{\text{эф}}/\tau_{\text{сн}}$ . Наявність в (6), (7) складових, що містять  $P_1$ , обумовлено нелінійними перетвореннями сигналів  $S_{1,2}(t)$  в фазоізометрі.

Сопоставляя (8) с (10) и (9) с (11) приходим к выводу, что  $P_1 \ll P_s$ , а  $\rho_1 \sim \rho_2$ . Поэтому в формулах (6) и (7) можно также пренебречь слагаемыми, содержащими  $P_1$ . Подставив (5)-(7) в (4), в итоге получаем следующую формулу для дисперсии оценки разности фаз  $\Delta\phi$ :

$$D\{\Delta\phi\} \approx \left(1/\left(8m\rho_1^2 q_0^2\right)\right) \cdot (1+4q_0), \quad (12)$$

где  $q_0$  – отношение мощности сигнала  $P_s$  к мощности шума  $P_{\text{ш}}$ . Из (12) следует, что при нарушении условия (2), то есть при  $\rho_1 \ll 1$ , случайная ошибка измерения разности фаз резко увеличивается.

Сопоставим результаты оценки дисперсии  $D\{\Delta\phi\}$  по формуле (12) с результатами моделирования на ЭВМ работы схемы рис. 1, проведенного в [6]. В [6] получено, что при  $q_1 = 1$ ,  $m \approx 40$  и  $\rho_1 \approx 0,15$  дисперсия оценки разности фаз равна 1,04. При подстановке указанных значений  $q_0, m$  и  $\rho_1$  в формулу (12) получаем  $D\{\Delta\phi\} = 0,67$ , что удовлетворительно согласуется с данными работы [6]. Таким образом, формула (12) дает вполне удовлетворительные результаты при оценке точности измерения разности фаз сигналов с флуктуирующими амплитудой и фазой.

## Выводы

Полученное в рамках теории некогерентного рассеяния радиоволн соотношение для оценки дис-

персии  $D(\Delta\phi)$  разности фаз между обычным и необычным компонентами сигналов рассеянных на ионосферной плазме позволяет оценить точность измерения угла фарадеевского вращения плоскости поляризации фазоизмерителем синтезированным в [3].

## Список литературы

1. Карлов В.Д. Перспективи використання та модернізації південного центру радіотехнічного спостереження / В.Д. Карлов, С.О. Корняков, Д.В. Карлов // Тези доповідей 9 науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» - Феодосія, 2009. – С. 131-132.
2. Карлов В.Д. Использование информации о среде распространения радиоволн для повышения точности измерения дальности элементов сложной баллистической цели / В.Д. Карлов, А.Н. Чёрный, О.В. Бесова // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Харків, 2012. – Вип. 4(33). – С. 75-78.
3. Карлов В.Д. Анализ влияния мешающего сигнала на точность измерения полезного в устройствах, содержащих фильтр, согласованный с зондирующим сигналом. / В.Д. Карлов, О.К. Шейгас, А.Н. Чорный, О.В. Бесова // Тези доповідей 8 науково-технічної конференції «Новітні технології – для захисту повітряного простору» - Харків, 2012. – С. 300.
4. Рогожкин Е.В. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния: моногр. / Е.В. Рогожкин, В.А. Пуляев, В.Н. Лысенко. – Х.: НТУ ХПИ, 2008. – 254 с.
5. Більчук В.М. Теорія ймовірностей, випадкові процеси та математична статистика. Підручник / В.М. Більчук. – Х.: ХУПС, 2009. – 436 с.
6. Карлов В.Д. Метод некогерентного рассеяния радиоволн. Конспект лекцій / В.Д. Карлов, Г.Н. Ткачев. – Х. ВИРТА ПВО. 1984. – 60 с.

Поступила в редакцію 27.03.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко Харківський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ДО ПИТАННЯ ПРО ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ КУТА ФАРАДЕЄВСЬКОГО ОБЕРТАННЯ ПЛОЩИНИ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ДВОКАНАЛЬНИМ ФАЗОВИМІРЮВАЧЕМ

В.Д. Карлов, А.М. Черний, О.В. Бесова

У статті у рамках теорії некогерентного розсіяння сигналів на іоносферній плазмі отримано вираження для оцінки точності виміру кута  $\Phi$  фарадеевського обертання площини поляризації двокавальним фазовимірювачем синтезованим за критерієм максимуму логарифма відношення правдоподібності. Розглянута можливість використання отриманого співвідношення для дисперсії оцінки  $\Phi$  стосовно випадку його виміру по різниці фаз між звичайним і незвичайним компонентами сигналу розсіяного на теплових флуктуаціях електронної концентрації іоносфери.

**Ключові слова:** іонізоване середовище, фазовимірювач, ефект Фарадея.

## TO QUESTION ABOUT EXACTNESS OF MEASURING OF CORNER OF FARADAY ROTATIONS OF PLANE OF POLARIZATION BY A TWOCHANNEL ELECTRONIC PHASE-ANGLE METER

V.D. Karlov, A.M. Cherny, O.V. Besova

In the article within the framework of theory of non-coherent dispersion of signals on ionosphere plasma expression for the estimation  $F$  of exactness of measuring of corner component of Faraday rotation of plane of polarization is got twochannel electronic phase-angle meter synthesized on the criterion of a maximum of logarithm of relation of verisimilitude. Possibility of the use of the got correlation is considered for dispersion of estimation  $F$  as it applies to the case of his measuring on the difference of phases between usual and unusual component of signal dissipated on thermal fluctuations of electronic concentration of ionosphere.

**Keywords:** the ionized environment, electronic phase-angle meter, effect of Faraday.